

УДК 550.832+552.08:53

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ НА ДИАГРАММЫ ИНДУКЦИОННОГО И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА

Е.И. Штанько¹, Д.А. Архипов¹, М.И. Эпов^{1,2}

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

² Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья,
630091, Новосибирск, Красный просп., 67, Россия

Приведены результаты исследования эффекта вызванной магнитной поляризации глинистых пластов под действием внешнего гармонического электромагнитного поля (частоты 70 и 875 кГц). Предложена двухэтапная процедура численного моделирования. Первый этап заключается в определении эффективной относительной магнитной проницаемости синтетического образца с включениями глинистых частиц. При этом генерируется трехмерный гетерогенный сеточный образец. Затем численно моделируется пространственное распределение электрического поля. По этому распределению рассчитывается наведенная в измерительной катушке электродвижущая сила (ЭДС). Относительная магнитная проницаемость определяется сравнением с ЭДС однородных образцов с различными значениями магнитной проницаемости. Установлено, что при возбуждении электрического поля катушкой с переменным током в образце с глинистыми частицами проявляется эффект наведенной магнитной поляризации. Его проявление состоит в том, что эффективная магнитная проницаемость становится комплексной. На втором этапе вычисляется диаграмма ЭДС трехкатушечного каротажного зонда в макромоделе глинистая покрывка—коллектор. При этом магнитная проницаемость глинистой покрывки задается комплексной величиной. На сгенерированных каротажных диаграммах в окрестности подошвы глинистой покрывки появляются экстремумы, не соответствующие распределению электропроводности и магнитной проницаемости в заданной модели. Они могут быть некорректно интерпретированы при анализе реальных каротажных диаграмм в отдельные пласты. Численное моделирование на всех этапах выполняется векторным методом конечных элементов на согласованном адаптивном тетраэдральном разбиении и векторном базисе Вебба первого полного порядка.

Метод конечных элементов, уравнение Гельмгольца, магнитная поляризация, индукционный каротаж, электромагнитный каротаж, глинистые пласты

INFLUENCE OF MAGNETIC POLARIZATION ON DIAGRAMS OF INDUCTIVE AND ELECTROMAGNETIC LOGS

E.I. Shtanko, D.A. Arkhipov, M.I. Epov

We present the results of the study of the effect of induced magnetic polarization of clay beds under the influence of an external harmonic electromagnetic field (frequencies 70 and 875 kHz). A two-stage numerical modeling procedure is proposed. At the first stage we determine the effective relative magnetic permeability of a synthetic sample with inclusions of clay particles. In this case a 3D heterogeneous mesh sample is generated. Then we numerically model a spatial distribution of an electric field. The electromotive force (EMF) induced in the measuring coil is calculated from this distribution. Relative magnetic permeability is determined by comparison with EMF of homogeneous samples with different values of magnetic permeability. It has been found that during the electric field excitation by an alternating current coil, the effect of induced magnetic polarization appears in the sample with clay particles. Its manifestation is that the effective magnetic permeability becomes complex. At the second stage we calculate the EMF diagram of the three-coil logging probe in the macro-model 'clay cap – reservoir'. Magnetic permeability of the clay cap is given by a complex value. In the generated logs, extremes appear in the vicinity of the bottom of the clay cap; they do not correspond to the distribution of electrical conductivity and magnetic permeability in the given model. They can be incorrectly interpreted when analyzing real logs into individual formations. Numerical modeling at all stages is performed by the Vector Finite Element Method on a consistent adaptive tetrahedral partition and the first-order Webb vector basis.

Finite Element Method, Helmholtz equation, magnetic polarization, induction logging, electromagnetic logging, clay formations

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время индукционный (ИК) и электромагнитный (ЭМК) каротаж широко применяются для идентификации нефтегазоносных коллекторов при проведении геофизических исследований в скважинах (ГИС). По данным этих методов восстанавливается профиль удельной электропроводности

(УЭП) разреза и оцениваются такие параметры, как толщина, глубина залегания, пористость и нефтегазонасыщенность коллектора [Эпов, Глинских, 2005; Эпов и др., 2013; Радченко, 2018; Jiang, 2021]. Их использование наиболее эффективно при исследовании разрезов с высоким и средним УЭП пластов. Моделирование ЭДС, наведенной в приемных катушках, является основой для дальнейшего решения обратных задач и восстановления геоэлектрической модели среды по результатам скважинных измерений [Епов et al., 2020; Nechaev et al., 2021]. Точность и скорость решения прямой задачи оказывают значительное влияние на качество и время выполнения последующей инверсии. В зависимости от особенностей изучаемой среды применяются различные методы численного моделирования. Моделирование физических полей в наиболее сложных случаях обычно выполняют методом конечных элементов (МКЭ) [Chang, Anderson, 1984; Badea et al., 2001; Kang et al., 2022; Нечаев и др., 2023] и его модификациями [Ren et al., 2014]. Повышение размерности модели до двухмерной и трехмерной и приближение ее к реальной также вызывает интерес для повышения достоверности выделения и локализации нефтегазоносных коллекторов [Pardo, Torres-Verdín, 2013; Kang et al., 2022; Нечаев и др., 2023].

Вычислительные схемы, построенные на базе метода конечных элементов и его модификаций, являются гибким инструментом для моделирования электромагнитных процессов в скважинах. Они широко применяются для численного воспроизведения сигналов каротажа, так как позволяют учитывать различные специфические особенности пластов. Моделированию откликов ИК и ЭМК в наклонно-трещиноватых средах посвящены работы [Khoshbakht et al., 2016; Nan et al., 2021; Kang et al., 2022]. В них проанализировано влияние суммарного заряда и вихревых токов. Наряду с численным моделированием выполнены натурные измерения и показано их хорошее совпадение. Влияние анизотропии пласта исследовано в работах [Wang et al., 2006; Sun, Vie, 2008]. Изучение откликов, полученных в средах с разнонаклонными относительно скважины пластами, приведено в статьях [DeLaurier et al., 1983; Weiss, Newman, 2003]. Проявление магнитных эффектов на диаграммах каротажных измерений и влияние магнитных прослоев на отклики также исследовались численными методами (конечно-разностными и конечно-элементными) [Anderson et al., 1995; Cheryauka, Sato, 2002].

В ряде публикаций приводились «странные» диаграммы ИК с экстремумами, которые не инвертируются и не находят объяснения при изучении разрезов другими геофизическими методами. Обычно такой материал считается некондиционным и удаляется из рассмотрения. Мы предполагаем, что такие экстремумы могут быть связаны с эффектами магнитной поляризации пород при воздействии на них гармоническим электромагнитным полем токовых катушек. Для изучения этого эффекта были проанализированы результаты численного моделирования ЭДС на двух масштабах: керна (петрофизика) и коллектора (каротаж).

На первом этапе исследовалось проявление эффектов магнитной поляризации в образцах с включениями глины. Вычислялась наведенная ЭДС, обусловленная электромагнитным воздействием на гетерогенный образец, и определялась его эффективная магнитная проницаемость. На основе полученных данных было установлено, что последняя является комплексной величиной. На втором этапе исследования проведено численное моделирование ЭДС трехкатушечных зондов в слоистой среде, верхний пласт которой представляет собой глинистую покрывку. Магнитная проницаемость глинистой покрывки была задана в соответствии с ее определением на первом этапе. На полученных ИК и ЭМК диаграммах кажущейся электропроводности вблизи подошвы глинистой покрывки обнаружены ложные экстремумы. Они практически не поддаются интерпретации и вызывают сложности при инверсии.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МОДЕЛЬНОГО ОБРАЗЦА С ГЛИНИСТЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Для исследования эффекта магнитной поляризации в гетерогенной среде при частотном возбуждении электромагнитного поля был сгенерирован синтетический образец с включениями глинистых частиц. Кубический образец, содержащий примерно 10 % глинистых сферических включений, помещен во внешний изолирующий куб. На верхней грани внутреннего образца расположена генераторная катушка S (радиус $r_S = 0.02$ м), максимальная амплитуда переменного тока в которой составляет 1 А. На нижней грани образца помещена приемная катушка R (радиус $r_R = 0.02$ м) для регистрации наведенной ЭДС (V). Для получения распределения напряженности электрического поля E (В/м) во всей расчетной области Ω_{micro} решается векторное уравнение Гельмгольца:

$$\text{rot } \mu^{-1} \text{rot } \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = -i\omega \mathbf{J} \text{ в } \Omega_{micro}, \quad (1)$$

где $k^2 = i\omega\sigma - \omega^2\varepsilon$, $\varepsilon = \varepsilon_r\varepsilon_0$, ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость, $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ (Ф/м); σ — удельная электропроводность среды (См/м), $\mu = \mu_r\mu_0$, μ_r — относительная магнитная проницаемость; $\mu_0 = 1.256 \cdot 10^{-6}$ (Гн/м); $\omega = 2\pi f$ — циклическая частота (Гц); f — частота источника возбуждения поля (Гц); \mathbf{J} — вектор плотности тока в источнике (А/м²); Ω_{micro} — образец (м³) с внешней границей Γ_{micro}^E (рис. 1).

На внешних границах расчетной области (внешнего куба) заданы однородные электрические условия вида:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E} \Big|_{\Gamma_{micro}^E} = 0, \quad (2)$$

где \mathbf{n} — внешняя единичная нормаль к границе Γ_{micro}^E расчетной области Ω_{micro} (см. рис. 1).

Внешний куб — $0.08 \times 0.08 \times 0.08$ м. Размеры внутреннего куба (образца с включениями глинистых частиц) $0.05 \times 0.05 \times 0.05$ м. Радиус сферических глинистых включений 0.00188 м (рис. 2). Относительная объемная концентрация глинистых частиц 9.98% , их удельная поверхность — 0.0236 м². Наличие контрастных по отношению к вмещающей среде хаотично расположенных включений значительно искажает распределение напряженности электрического поля по сравнению с однородной средой. Влияние формы, числа и распределения включений на особенности применения метода конечных элементов показано в предшествующих работах авторов [Shurina et al., 2014, 2022].

Для определения эффективной магнитной проницаемости был выполнен расчет наведенной в приемной катушке ЭДС при помещении образца с включениями глинистых частиц между генераторной S и приемной R катушками. Значения реальной и мнимой частей ЭДС сравнивались с ЭДС, рассчитанной для однородного образца без включений при изменении его относительной магнитной проницаемости в диапазоне от 0.8 до 2.2 . При этом по сравнению реальных частей ЭДС подбиралась реальная часть относительной магнитной проницаемости, а по сравнению мнимых частей ЭДС — ее мнимая часть.

Прямая задача о распределении электромагнитного поля в объеме исследуемого образца в постановке (1), (2) решается векторным методом конечных элементов (ВМКЭ) [Hiptmair, 2002]. Вводится следующее функциональное пространство:

$$H_0(\text{rot}, \Omega) = \left\{ \mathbf{u} \in L_2(\Omega) : \text{rot } \mathbf{u} \in L_2(\Omega), \mathbf{u} \times \mathbf{n} \Big|_{\partial\Omega} = 0 \right\},$$

где расчетная область $\Omega \in R^3$ с непрерывной по Липшицу границей $\partial\Omega$, \mathbf{n} — внешний вектор-нормаль к $\partial\Omega$. Определенная в нем норма имеет вид:

$$\|\mathbf{u}\|_{H_0(\text{rot}, \Omega)} = \left(\|\mathbf{u}\|_{L_2(\Omega)}^2 + \|\text{rot } \mathbf{u}\|_{L_2(\Omega)}^2 \right)^{1/2},$$

$$\|\mathbf{u}\|_{L_2(\Omega)} = \left(\int_{\Omega} \mathbf{u}^T \mathbf{u} d\Omega \right)^{1/2} \equiv (\mathbf{u}, \mathbf{u})_{L_2(\Omega)} < \infty.$$

Вариационную постановку можно выписать следующим образом: для $\mathbf{J} \in L_2(\Omega)$ найти $\mathbf{E} \in H_0(\text{rot}, \Omega)$ такое, что $\forall \mathbf{e} \in H_0(\text{rot}, \Omega)$

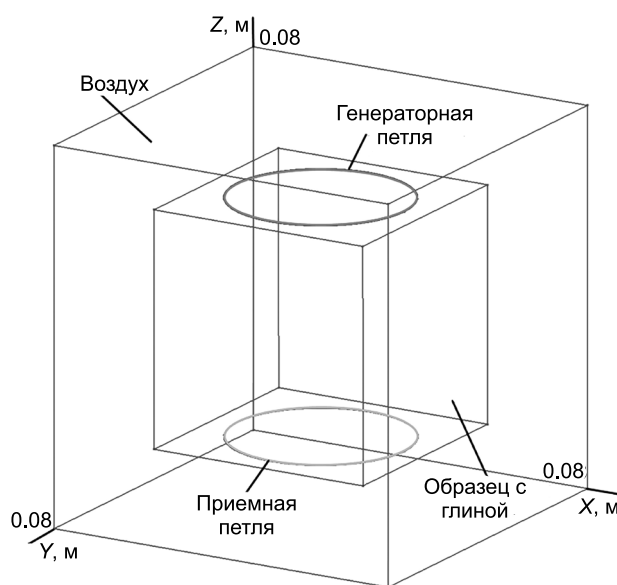


Рис. 1. Расчетная область с генераторной S и приемной R катушками.

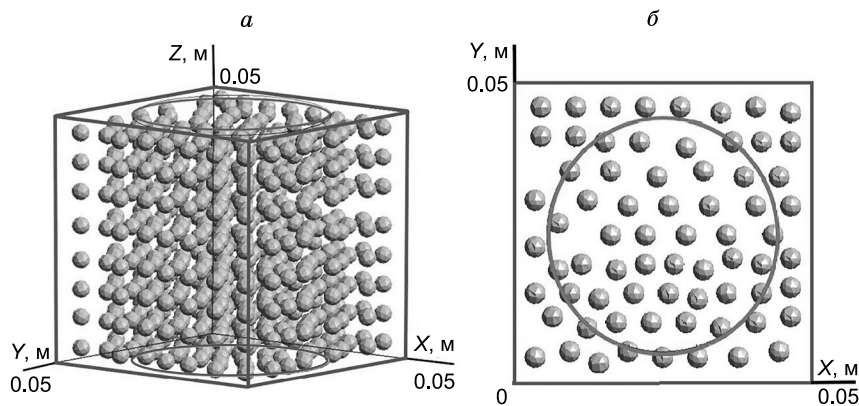


Рис. 2. Внутренняя структура образца:

a — расположение включений; *б* — вид сверху генераторной катушки *S* относительно внутренней структуры.

$$(\mu^{-1} \text{rot } \mathbf{E}, \text{rot } \mathbf{e})_{L_2(\Omega)} + (k^2 \mathbf{E}, \mathbf{e})_{L_2(\Omega)} = -i\omega(\mathbf{J}, \mathbf{e})_{L_2(\Omega)} \text{ в } \Omega_{micro}.$$

Дискретная вариационная формулировка вводится на тетраэдральном согласованном сеточном разбиении $T_h(\Omega) = \bigcup_{i=1}^N \Omega_i$ в пространстве $H_0^h(\text{rot}, \Omega) \subset H_0(\text{rot}, \Omega)$. Базисные функции $\mathbf{w}_j^i \in H_0^h(\text{rot}, \Omega)$, $j=1, \dots, 12$ вводятся на каждом элементе $\Omega_i \in T_h(\Omega)$ и ассоциируются с его ребрами (по 2 функции на ребро). Искомая функция представима в виде разложения по введенному базису $\mathbf{E} = \sum_{i=1}^{2N_E} q_i \mathbf{w}_i$ с некото-

рыми неизвестными весами q_i , $i=1, \dots, 2N_E$, N_E — количество ребер в сеточном разбиении. В работе реализован ВМКЭ на векторном базисе Вебба первого полного порядка. Соленоидальная составляющая поля и его градиентная составляющая аппроксимируются отдельно соленоидальными и градиентными функциями базиса соответственно [Webb, 1999]. Из-за большого числа включений, высокой операционной частоты и контраста физических характеристик нет необходимости в базисе более высокого порядка. Поскольку решение физических задач в постановках, приближенных к реальным, требует компромисса между точностью решения и временем их решения. Ослабленные требования на гладкость (обеспечение непрерывности только тангенциальной компоненты поля \mathbf{E}) позволяют естественным образом выполнять условия на границах сред и существенно улучшают качество моделирования в окрестности сингулярностей. Выбор тетраэдральных элементов обусловлен потребностью в аппроксимации большого числа внутренних криволинейных границ. Подробность сеточного разбиения определялась на серии сгущающихся сеточных дискретизаций. Критерием остановки измельчения выступает изменение результатов ЭДС в петле на соседних сетках менее чем на 1 %. Подробное описание верификации разработанного математического аппарата на аналитических функциях, вложенных сетках, базисах различных порядков приведено в работе [Михайлова, 2016].

Для минимизации влияния погрешности вычислений на результаты сравнения для однородного образца и образца с включениями строилось сеточное разбиение с сопоставимым числом конечных элементов: 1 037 538 — для образца с включениями; 1 042 755 — для однородных образцов с различными значениями μ_r . Физические характеристики образцов приведены в табл. 1.

Исследования выполнялись для двух операционных частот, характерных для каротажных измерений: 70 кГц (ИК) и 875 кГц (ЭМК). Решение задач (1), (2) рассматривается в квазистационарном приближении ($\epsilon_r = 0$ во всей расчетной области Ω_{micro}). В таблице 2 приведены вычисленные значения реальной F_{Re} и мнимой F_{Im} частей ЭДС в зависимости от μ_r однородного и неоднородного образцов. Расчет ЭДС выполнен по формуле [Тамм, 2003]:

$$F^R = \oint_R \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}, \quad (3)$$

где R — приемная катушка.

Таблица 1. Физические характеристики образцов

Образец	μ_r	σ , См/м
Внешний изолятор	1.0	0.0
Однородный образец	0.8—2.2	0.1
Включения — глина, 9.98 %	1.0	0.5

Таблица 2. Рассчитанные значения ЭДС для однородных и неоднородных образцов

Образец	$f = 70 \text{ кГц}$			$f = 875 \text{ кГц}$		
	μ_r	$F_{\text{Re}} 10^{-9}, \text{ В}$	$F_{\text{Im}} 10^{-4}, \text{ В}$	μ_r	$F_{\text{Re}} 10^{-7}, \text{ В}$	$F_{\text{Im}} 10^{-3}, \text{ В}$
Однородный	1.000	2.13	2.11	0.8	2.97	2.58
	1.125	2.24	2.00	1.0	3.36	2.51
	1.250	2.34	1.90	1.2	3.64	2.41
	1.500	2.48	1.80	1.4	3.83	2.29
				1.6	3.97	2.18
	2.000	2.62	1.60	2.0	4.15	2.01
				2.2	4.21	1.85
С глинистыми частицами	1.000	2.24	2.11	1.0	4.16	2.52

Из приведенных в табл. 2 результатов численного моделирования можно предположить, что эффективная относительная магнитная проницаемость образца с глинистыми частицами является комплексной величиной. На основе этого получены следующие значения эффективной магнитной проницаемости: $\mu_1^{\text{эф}} = 1.125 + i$ на операционной частоте 70 кГц и $\mu_2^{\text{эф}} = 2 + 0.987i$ для частоты 875 кГц.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ В МОДЕЛИ ГЛИНИСТАЯ ПОКРЫШКА—КОЛЛЕКТОР С ИНДУЦИРОВАННОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ

Численное моделирование ЭДС трехкатушечных зондов выполнялось в расчетной области Ω (рис. 3). Верхний пласт Ω_1 — глинистая покрывка с 10 %-м объемным содержанием глинистых частиц. Ее относительная магнитная проницаемость рассчитана на предыдущем этапе для синтетического образца с 10 %-м объемным содержанием глинистых включений и является комплексной величиной, изменяющейся в зависимости от операционной частоты. Остальные физические характеристики подобластей приведены в табл. 3.

Предполагается, что относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 0$ во всей области Ω . Подобласть Ω_2 — коллектор толщиной 0.5 м; Ω_3 — подстилающая среда; Ω_4 — цилиндрическая скважина, заполненная буровым раствором (радиус $r = 0.108 \text{ м}$); Ω_5 — соосный со скважиной цилиндрический корпус зонда конечной длины (1.5 м). Генераторная катушка имеет радиус 0.05 м, приемные катушки R_1 и R_2 соосны с генераторной катушкой и имеют тот же радиус. Геометрия и размеры зонда изображены на рис. 3, б.

В расчетной области Ω решалось векторное уравнение Гельмгольца (1) с однородными краевыми условиями (2) на боковых внешних границах. Значения ЭДС, наведенные в катушках R_1 и R_2 , вычислены по формуле (3) при продвижении зонда по скважине (23 положения зонда).

Зависимость от глубины привязана к середине расстояния между приемными катушками R_1 и R_2 :

$$z_i = \frac{z_i^{R_1} + z_i^{R_2}}{2}, i = 1, \dots, 23.$$

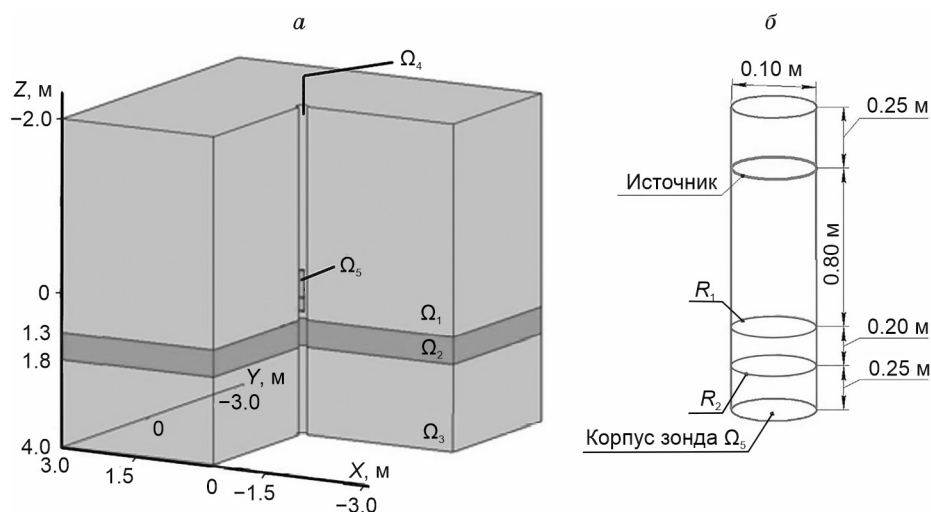


Рис. 3. Расчетная область Ω (а); трехкатушечный зонд (б): R_1 и R_2 — приемные катушки.

Таблица 3.

Физические характеристики подобластей $\Omega_i, i = 1, \dots, 5$

Подобласть Ω_i	μ_r	σ , См/м
Ω_1 , глинистая покрывка	$f = 70$ кГц: $1.125 + i$ $f = 875$ кГц: $2 + 0.987i$	0.5
Ω_2 , коллектор	1.000	0.1
Ω_3 , подстилающая среда	1.000	0.2
Ω_4 , скважина с буровым раствором	1.000	0.5
Ω_5 , корпус зонда	1.000	10^{-6}

Направление обхода источника — по часовой стрелке. Обход приемной катушки R_1 согласован с направлением течения тока в генераторной катушке и задан по часовой стрелке, обход приемной катушки R_2 — против часовой стрелки. На рис. 4 приведены диаграммы отношений амплитуд измеренных ЭДС:

$$\frac{|F^{R_1}|}{|F^{R_2}|} = \frac{\sqrt{(F_{\text{Re}}^{R_1})^2 + (F_{\text{Im}}^{R_1})^2}}{\sqrt{(F_{\text{Re}}^{R_2})^2 + (F_{\text{Im}}^{R_2})^2}}.$$

На рисунке 5 показаны разности фаз и на рис. 6 — кажущаяся электропроводность $\sigma^{\text{каж}}$, вычисленная из решения обратной задачи (4):

$$F_{\text{Re}}^{R_1}(\sigma^{\text{каж}}) - F_{\text{Re}}^{R_2}(\sigma^{\text{каж}}) = F_{\text{Re}}^{R_1}(\sigma_0) - F_{\text{Re}}^{R_2}(\sigma_0). \quad (4)$$

В правой части уравнения (4) представлены реальные части ЭДС, наведенные в приемных катушках в однородной среде с УЭП $\sigma_0 \in [\sigma_1, \sigma_2]$. Диапазон УЭП выбирается на основе априорной информации о среде. Слева — значения реальной части ЭДС, наведенные в области Ω (см. рис. 3) с электрофизическими характеристиками из табл. 3.

В качестве процедуры верификации выполнено сравнение рассчитанных численно ЭДС с найденными по аналитической формуле значениями. Известно, что в проводящей однородной среде при гармоническом режиме возбуждения тока в магнитном диполе ЭДС, наводимая в соосной измерительной катушке площадью S в случае, когда ее радиус a существенно меньше расстояния L между генераторной и приемной катушками, определяется по формуле [Ратушняк и др., 2017]:

$$F^A(\omega) = -i\omega\mu_r\mu_0 S \frac{M}{2\pi L} (1 + kL) e^{-kL},$$

где $M = JS_{\Gamma}$ — момент магнитного диполя, $J = 1$ А — сила тока в источнике, $S_{\Gamma} = \pi a^2$ — площадь генераторной катушки; $S = \pi a^2$ — площадь приемной катушки, a — радиус приемной и генераторной катушек, L — разнос катушек, $k = \sqrt{i\omega\mu_r\mu_0\sigma}$.

Так как данная формула применима для однородной проводящей среды и соосных катушек, разнесенных на достаточное расстояние, то расчет будет осуществляться в области, приведенной на рис. 3, а, при условии, что электрофизические параметры всех подобластей одинаковы и $\sigma = 0.1$ См/м во всей расчетной области. В качестве генераторной катушки рассматривается источник, приведенный на рис. 3, б, в качестве приемника примем катушку R_2 , тогда расстояние $L = 1$ м. В таблице 4 приведены результаты расчетов при варьировании μ_r . Так как в дальнейшем рассматривается только действительная часть ЭДС, то в таблице приведены только F_{Re} . Отметим также, что из вычисленных ЭДС необходимо вычесть ЭДС, наведенное в воздухе (при $\sigma = 0$).

Расхождение между аналитической формулой и численным решением для всех рассмотренных μ_r не превышает 5 %, что можно считать допустимым при работе с круглыми катушками, которые аппроксимируются в сеточном разбиении многоугольниками. Погрешность аппроксимации площади S для каждой из катушек 0.17 %, однако замена гладкой кривой многоугольником негативно влияет на аппроксимацию циркуляции тока в катушке, повышая погрешность вычислений.

На рисунках 4—6, б, в приведены диаграммы для глинистой покрывки с вещественной $\mu_r = 1$ при сохранении остальных характеристик подобластей в соответствии с приведенными в табл. 3.

Для заданных УЭП слоев при $\mu_r = 1$ отношения амплитуд ЭДС в приемных катушках на частотах 70 и 875 кГц неинформативны. Контраст УЭП между пластами в 2—5 раз не находит отражения на диаграммах (см. рис. 4, б, в) и коллектор по ним не выделяется. Для комплексной μ_r в окрестности по-

Таблица 4.

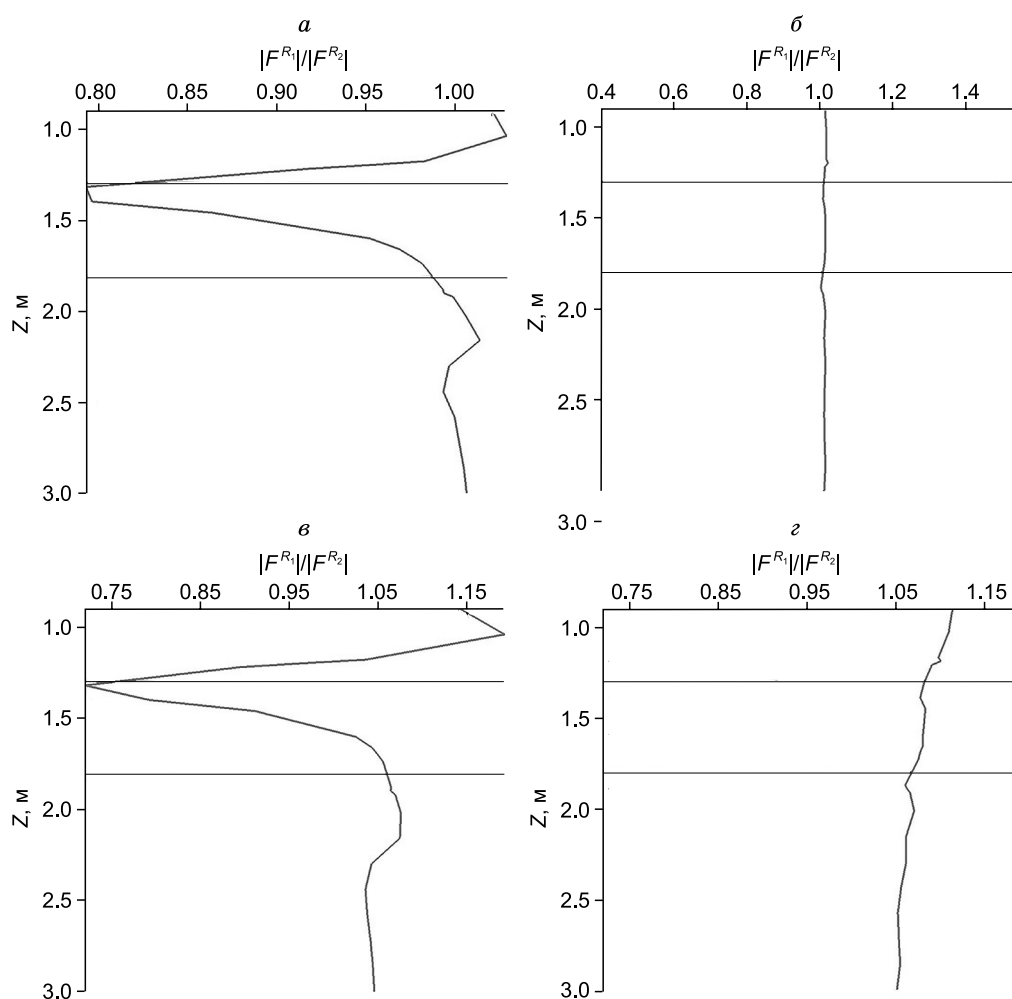
Рассчитанные значения ЭДС для однородной проводящей среды

μ_r	F_{Re}^A , В	$F_{\text{Re}}^{R_2}$, В	$\left \frac{F_{\text{Re}}^A - F_{\text{Re}}^{R_2}}{F_{\text{Re}}^A} \right \cdot 100\%$
1 ($f = 70$ кГц)	6.27E-07	6.52E-07	3.99
$1.125 + i$ ($f = 70$ кГц)	2.09E-06	1.99E-06	4.78
$2 + 0.987i$ ($f = 875$ кГц)	3.97E-05	3.81E-05	4.03

дошвы глинистой покрышки находится минимум (см. рис. 4, а, в), который при интерпретации можно связать с тонким сильноконтрастным по УЭП прослоем. При частоте 70 кГц на границе сред с комплексной и вещественной μ_r достигается минимальное отношение амплитуд ЭДС, равное 0.79. Для среды с $\mu_2^{\text{эфф}} = 2 + 0.987i$ (частота 875 кГц) минимум достигается на этой же границе, но равен 0.70. Возникновение этого минимума обусловлено мнимой частью μ_r , которая на этих частотах отличается на 1.3 %. При этом скачок на границе в то же время отличается на 11.3 %, а реальные составляющие $\mu_1^{\text{эфф}}$ и $\mu_2^{\text{эфф}}$ отличаются на 77 %.

На рисунке 5 приведены результаты расчетов другой измеряемой величины — разности фаз $\varphi_1 - \varphi_2$. Она вычислялась по следующей формуле:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \arccos \left(\frac{F_{\text{Re}}^{R_1} \cdot F_{\text{Re}}^{R_2} + F_{\text{Im}}^{R_1} \cdot F_{\text{Im}}^{R_2}}{|F^{R_1}| \cdot |F^{R_2}|} \right). \quad (5)$$

Рис. 4. Отношение амплитуд ЭДС в приемниках R_1 и R_2 :

а — 70 кГц, μ_r — комплексная; б — $\mu_r = 1$; в — 875 кГц, μ_r — комплексная; г — $\mu_r = 1$.

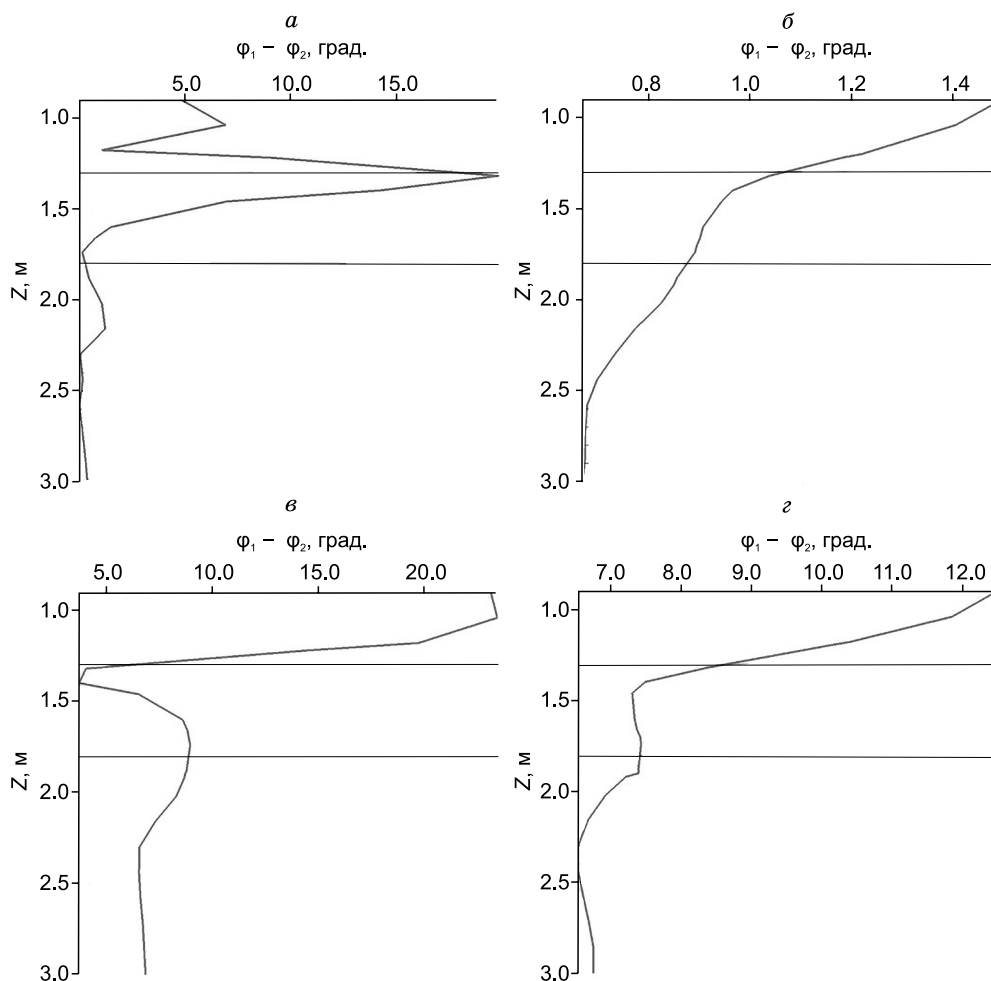


Рис. 5. Разность фаз в приемниках R_1 и R_2 :

a — 70 кГц, μ_r — комплексная; $б$ — $\mu_r = 1$; $в$ — 875 кГц, μ_r — комплексная; $г$ — $\mu_r = 1$.

На рисунке 5, $в$, $г$ видно, что на диаграммах разности фаз выделяется коллектор. Однако на более низкой частоте его границы слабо разрешены. Согласно (5), разность $\varphi_1 - \varphi_2 \in [0; 180^\circ]$ и не может быть отрицательной величиной. По диаграммам (см. рис. 5, $а$) видно, что экстремум на кровле коллектора находится в отрицательной области с минимальным значением около 20° . Это означает, что сигнал в дальней приемной катушке R_2 опережает по времени сигнал в ближней приемной катушке R_1 . Такая ситуация является физически нереализуемой. Однако появление на каротажных диаграммах подобных аномалий должно привлечь к этому интервалу особое внимание, так как может быть проявлением эффекта магнитной поляризации в глинистой покровке.

На диаграммах для 875 кГц такой переход не наблюдается, однако также есть скачок на границе глинистой покровки и коллектора. Для $\mu_r = 1$ диаграммы разности фаз являются более информативными, чем отношение амплитуд и позволяют отследить изменение УЭП пластов. При этом на частоте 70 кГц разность фаз не превышает 1.5° для среды с вещественной μ_r . Это не позволяет выделить коллектор из-за малости сигнала.

На рисунке 6 приведены рассчитанные из решения обратной задачи (4) диаграммы кажущейся УЭП.

На частоте 70 кГц при вещественном значении μ_r (см. рис. 6, $б$), как и в случае с диаграммой разности фаз (см. рис. 5, $б$), идентификация коллектора затруднена, и рассчитанная кажущаяся УЭП не соответствует заданной в исходной модели. Это объясняется тем, что толщина скин-слоя в данном случае составляет $\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu_0 \mu_r f \sigma}} = 2.69$ м [Тамм, 2003]. Соответственно, коллектор толщиной 0.5 м оказы-

вается ниже разрешающей способности метода. На частоте 875 кГц при $\mu_r = 1$ (см. рис. 6, $г$) четко вы-

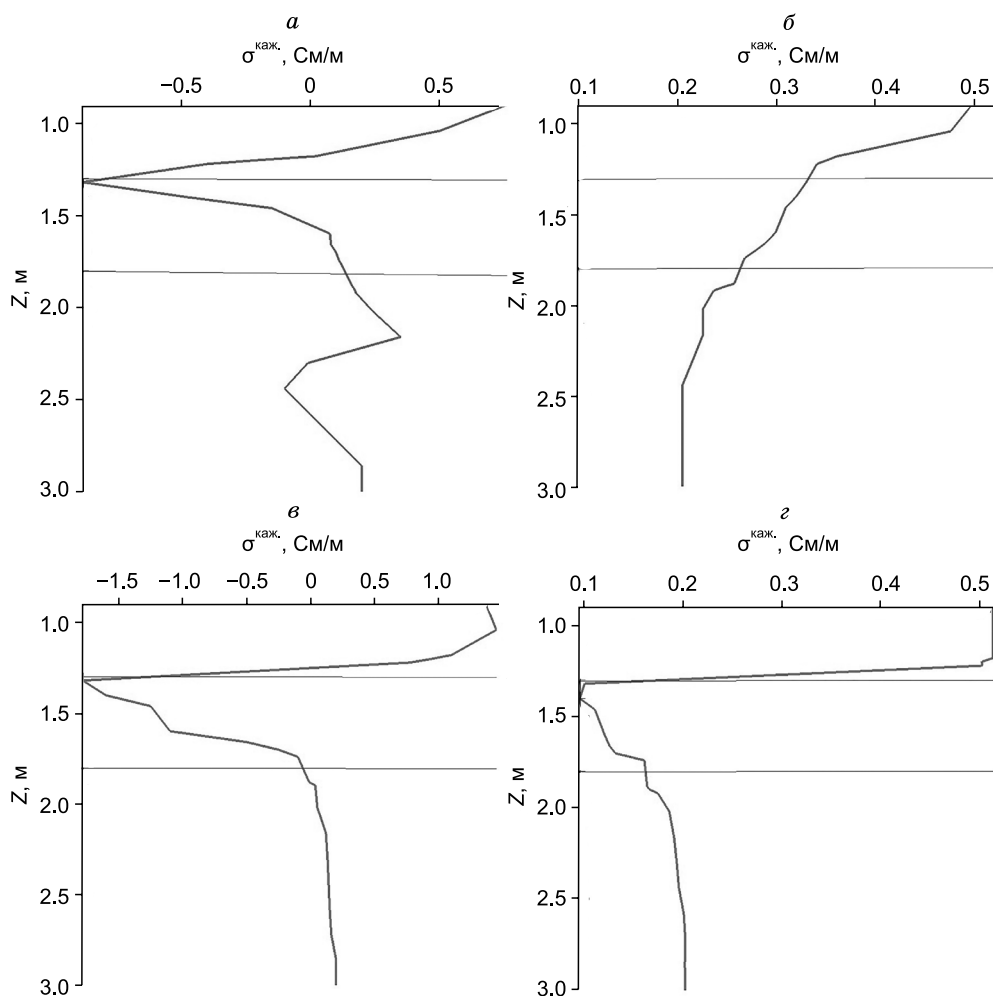


Рис. 6. Кажущаяся электропроводность по реальной части ЭДС:

а — 70 кГц, μ_r — комплексная; *б* — $\mu_r = 1$; *в* — 875 кГц, μ_r — комплексная; *г* — $\mu_r = 1$.

ражена кровля коллектора. Контраст УЭП коллектора и подстилающей среды небольшой (отличие в 2 раза), поэтому подошва коллектора определяется хуже.

Для комплексной μ_r отмечается переход диаграммы в область отрицательных значений в окрестности границы глинистой покрышки и коллектора. Для частоты 70 кГц минимум приходится на кровлю коллектора, где $\sigma_{70\text{кГц}}^{\text{каж.}} = -1.0$. Минимум для частоты 875 кГц также совпадает с границей глинистая покрышка—коллектор и равен $\sigma_{875\text{кГц}}^{\text{каж.}} = -1.8$. При интерпретации диаграмм (рис. 6, *а*, *в*) может быть выдвинуто предположение о наличии тонкого сильноконтрастного прослоя толщиной 0.2 м на глубине 1.3 м, что является артефактом и не соответствует заданной модели.

Возникает предположение, что для комплексного значения относительной магнитной проницаемости на подошве глинистой покрышки концентрируется поверхностный ток. На рисунке 7 приведено распределение вычисленной магнитной индукции **В** (вертикальная компонента B_z) в сечении YZ, проходящем перпендикулярно пластам. Расчеты приведены для частоты 875 кГц.

На границе сред с комплексной и вещественной относительной магнитной проницаемостями концентрируется поверхностный ток с плотностью $j_{\text{пов.}}$. На рисунке 8 приведено распределение вычисленной плотности поверхностного тока $j_{\text{пов.}}$ на кровле пласта. Показаны реальная и мнимая части модуля $j_{\text{пов.}}$ по двум взаимно-перпендикулярным профилям. Расчеты приведены для частоты 875 кГц. На рисунке 8, *а* профиль пересекает скважину, но поверхностный ток в ней не отображался, поскольку скважина не содержит интересующей границы сред с вещественной и мнимой μ_r . Максимум амплитуды поверхностного тока приходится на окрестность скважины и резко затухает при удалении от нее.

Наведенный поверхностный ток генерирует скачок кажущейся УЭП на диаграммах. Такой скачок в ряде случаев может приводить к ошибкам интерпретации каротажных данных и быть принятым за сигнал от тонкого сильноконтрастного пласта. В немагнитной среде такого эффекта нет.

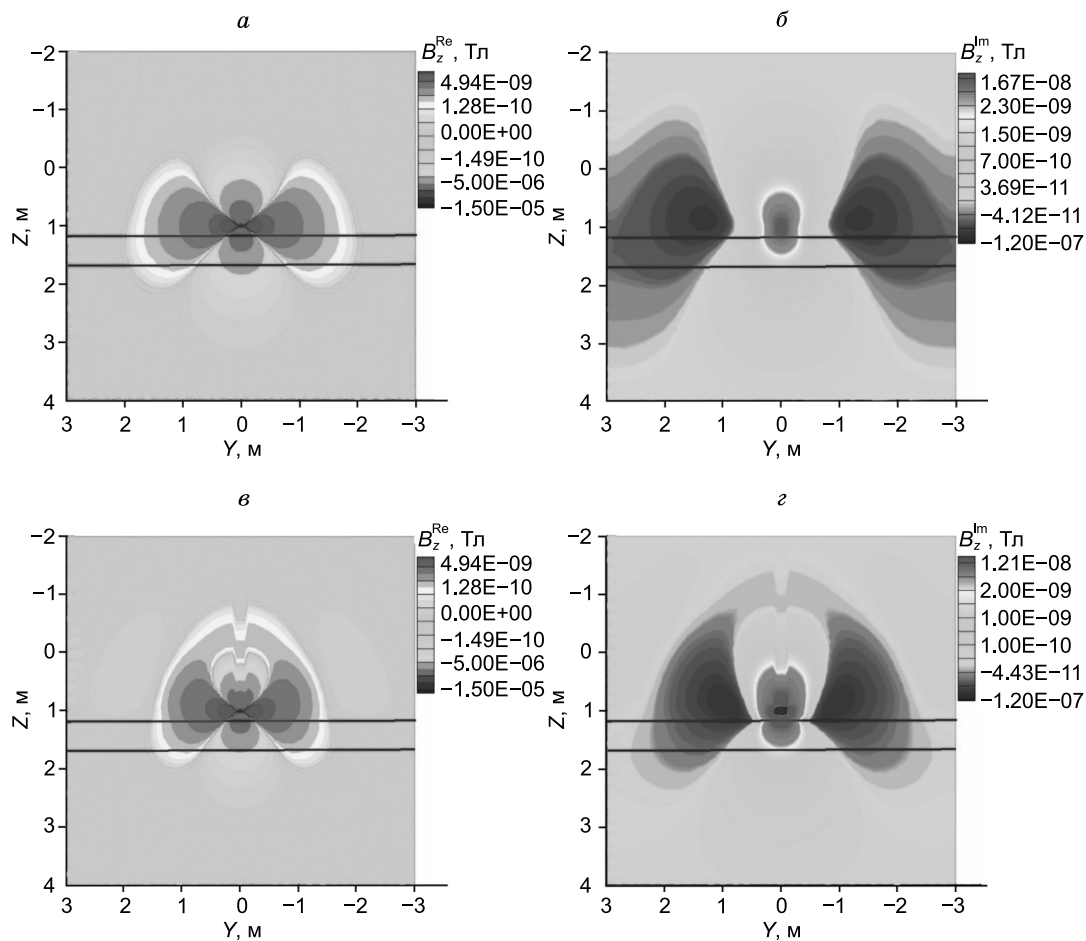


Рис. 7. Вертикальная компонента магнитной индукции B в сечении YZ ($x = 0$), 875 кГц:

a — реальная часть B_z , $\mu_r = 1$; $б$ — мнимая часть B_z , $\mu_r = 1$; $в$ — реальная часть B_z , $\mu_r = 2 + 0.987i$; $г$ — мнимая часть B_z , $\mu_r = 2 + 0.987i$.

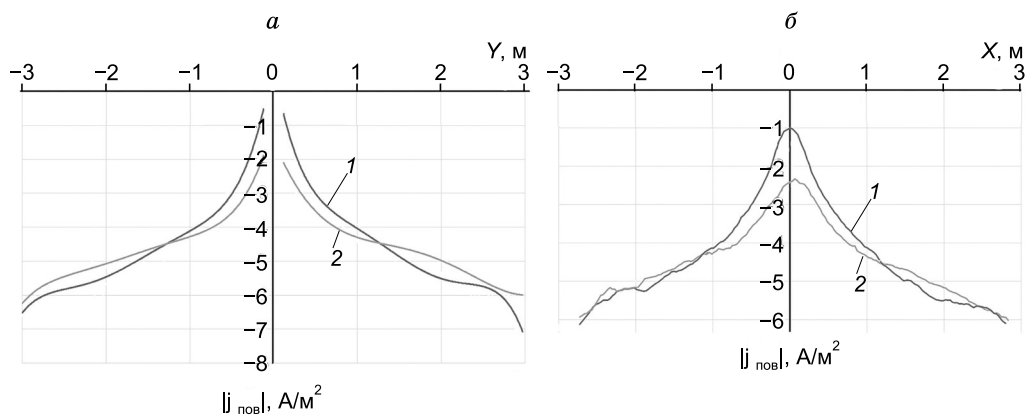


Рис. 8. Распределение модуля плотности поверхностного тока $j_{\text{пов.}}$ на кровле пласта (в логарифмической шкале), реальная j^{Re} (1) и мнимая j^{Im} (2) части:

a — по профилю $x = 0$; $б$ — по профилю $y = 0.125$ м.

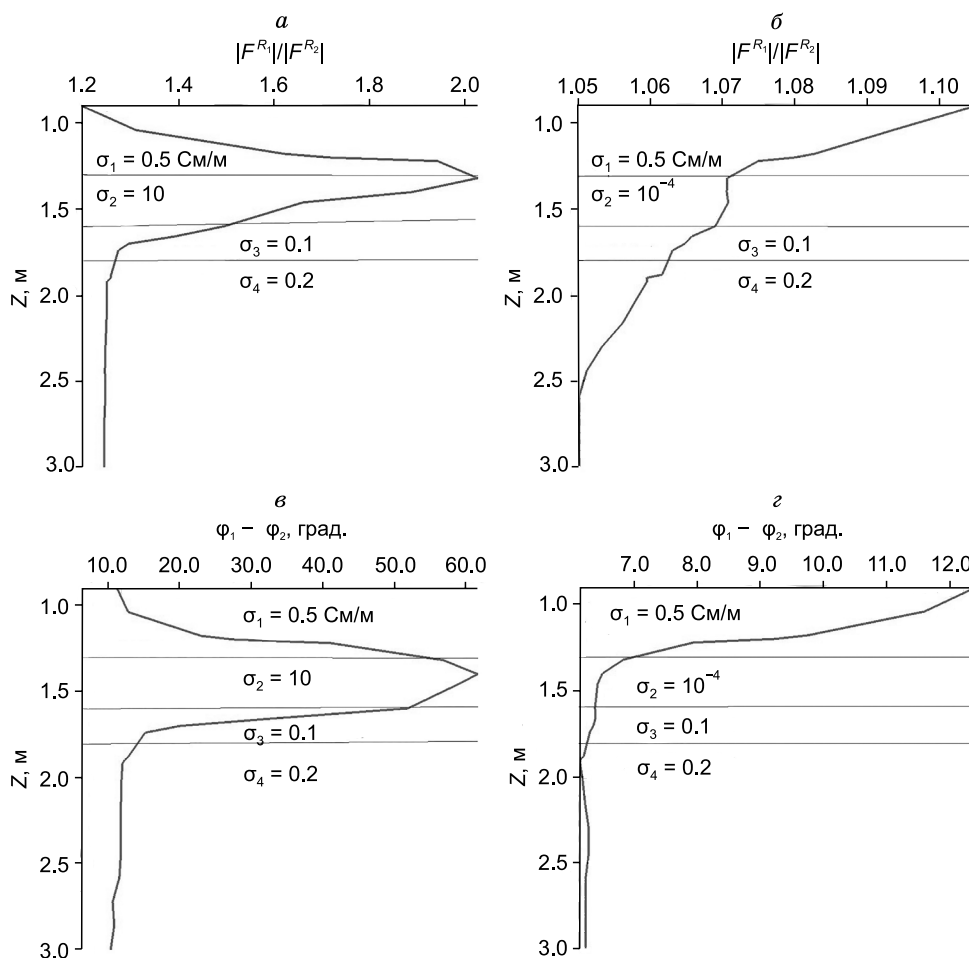


Рис. 9. Отношение амплитуд ЭДС в 4-слойной среде с проводящим прослоем $\sigma_2 = 10$ См/м (а); отношение амплитуд ЭДС с изолирующим прослоем $\sigma_2 = 10^{-4}$ См/м (б); разность фаз с проводящим прослоем $\sigma_2 = 10$ См/м (в); разность фаз с изолирующим прослоем $\sigma_2 = 10^{-4}$ См/м (г).

На рисунке 9 приведены синтетические диаграммы ЭМК в четырехслойной среде с проводящим тонким слоем с $\sigma_2 = 10$ См/м (а, в) и диэлектрическим тонким слоем с $\sigma_2 = 10^{-4}$ См/м (б, г).

Интерпретация приведенных выше диаграмм (см. рис. 4, 5) позволяет предположить наличие данного сильноконтрастного тонкого прослоя. Однако, согласно приведенным на рис. 9 прямым расчетам, можно сделать вывод, что получаемые в рамках немагнитных сред диаграммы на границе тонкого пласта демонстрируют иное распределение экстремумов. Для сильно проводящего тонкого прослоя отмечается появление максимума на границе сред. Для изолирующего прослоя можно отметить локальный минимум на границе сред, но величина скачка незначительна по сравнению с полученной в модели глинистая покрывка—коллектор (см. рис. 5, в).

Соответственно, в рамках немагнитных моделей провести инверсию полученных диаграмм (см. рис. 4, 5) не удастся, и такие кривые при интерпретации могут быть приняты за некорректные и ошибочно удалены из рассмотрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнено двухэтапное численное исследование эффекта магнитной поляризации в среде с частицами глины на уровне керна и на уровне каротажных измерений. На первом шаге определены магнитные свойства образца с глинистыми включениями, описываемые комплексной величиной относительной магнитной проницаемости. На втором шаге проведено численное моделирование на макроуровне — скважинных электромагнитных измерений. Рассмотрена модель глинистая покрывка—коллектор в присутствии скважины и подстилающего пласта. Возбуждение электромагнитного поля и регистрация сигнала проводилась в трехкатушечном зонде, введенным как часть среды, на уровне се-

точного разбиения. По рассчитанным распределениям электрического поля E в модельной среде были вычислены значения ЭДС, наведенные в приемных катушках, и построены диаграммы отношения их амплитуд, разности фаз и кажущейся электропроводности.

На основе выполненного численного моделирования сделан вывод, что при воздействии гармоническим электромагнитным полем на глинистую покрывку может проявляться эффект магнитной поляризации. Он приводит к появлению поверхностного тока на границе глинистой покрывки и коллектора. Это находит отражение на каротажных диаграммах в виде экстремумов, интерпретация которых в рамках немагнитных моделей среды невозможна.

Работа выполнена в рамках проекта FWZZ-2022-0030 «Исследование многофизических процессов в гетерогенных средах, представленных трехмерными цифровыми моделями в геофизических приложениях».

ЛИТЕРАТУРА

Михайлова Е.И. Математическое моделирование трехмерных электромагнитных полей в средах с микровключениями конформными и неконформными конечно-элементными методами: Автореф. дис.... к.ф.-м.н. Новосибирск, ИНГГ СО РАН, 2015, 19 с.

Нечаев О.В., Эпов М.И., Глинских В.Н. Единый подход к трехмерному моделированию процесса каротажа гальваническими и индукционными зондами в анизотропных средах // Геофизические технологии, 2023, т. 3, с. 25—33, doi: 10.18303/2619-1563-2022-3-25.

Радченко А.А. Интерпретация данных ГИС в тонкослоистом разрезе на примере терригенных отложений Западной Сибири // ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии. Тверь. ООО «Изд-во Полипресс», 2018, с. 353—357.

Ратушняк А.Н., Байдилов С.В., Теплухин В.К. Индукционный каротаж скважин в процессе бурения // Известия вузов. Горный журнал, 2017, т. 3, с. 93—102.

Тамм И.Е. Основы теории электричества. М., Физматлит, 2003, 616 с.

Эпов М.И., Глинских В.Н. Электромагнитный каротаж: моделирование и инверсия. Новосибирск, Изд-во «Гео», 2005, 98 с.

Эпов М.И., Глинских В.Н., Сухорукова К.В., Павлова М.А. Интерпретация данных электрокаротажных зондирований в неокомских пластах-коллекторах Широкого Приобья // Геология нефти и газа, 2013, т. 3, с. 21—28.

Anderson B., Barber T., Mowat G. Using induction tools to identify magnetic formations and to determine relative magnetic susceptibility and dielectric constant // The Log Analyst, 1995, v. 36 (04), p. 16—26.

Badea E.A., Everett M.E., Newman G.A., Biro O. Finite-element analysis of controlled-source electromagnetic induction using Coulomb-gauged potentials // Geophysics, 2001, v. 66 (3), p. 786—799, doi: 10.1190/1.1444968.

Chang S.-K., Anderson B. Simulation of induction logging by the finite-element method // Geophysics, 1984, v. 49 (11), p. 1943—1958, doi: 10.1071/EG984265b.

Cheryauka A.B., Sato M. Directional induction logging for evaluating layered magnetic formations // Geophysics, 2002, v. 67 (2), p. 427—437, doi: 10.1190/1.1468602.

DeLaurier J.M., Auld D.R., Law L.K. The geomagnetic response across the continental margin off Vancouver Island: Comparison of results from numerical modelling and field data // J. Geomagn. Geoelec., 1983, v. 35 (11—12), p. 517—528, doi: 10.5636/jgg.35.517.

Епов М.И., Сухорукова К.В., Нечаев О.В., Петров А.М., Рabinovich M., Weston H., Tyurin E., Wang G.L., Abubakar A., Claverie M. Comparison of the Russian and Western resistivity logs in typical Western Siberian reservoir environments: A numerical study // Petrophysics, 2020, v. 61 (01), p. 38—71, doi: 10.30632/PJV61N1-2020a1.

Jiang Y., Zhou J., Fu X., Cui L., Fang C., Cui J. Analyzing the origin of low resistivity in gas-bearing tight sandstone reservoir // Geofluids, 2021, v. 2021, p. 1—15, doi: 10.1155/2021/4341804.

Hiptmair R. Finite elements in computational electromagnetism // Acta Numer., 2002, v. 11, p. 237—339, doi: 10.1017/S0962492902000041.

Kang Z., Zhang Y., Hou B., Chen G., Hao X., Qin H., Qin W. Using the multi-component induction logging data to evaluate the geometric parameters of the hydraulic fracture // J. Geophys. Eng., 2022, v. 19 (5), p. 1163—1179, doi: 10.1093/jge/gxac076.

Khoshbakht F., Rasaie M.R., Shekarifard A. Investigating Induction Log response in the presence of natural fractures // J. Petrol. Sci. Eng., 2016, v. 145, p. 357—369, doi: 10.1016/j.petrol.2016.05.023.

Nan Z., Tan M., Li J., Fan X. Numerical simulation, response analysis, and physical experiment of induction logging in an inclined fractured formation // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2021, v. 60, p. 1—11, doi: 10.1109/TGRS.2021.3056133.

Nechaev O., Glinskikh V., Mikhaylov I., Moskaev I. Joint inversion of high-frequency induction and lateral logging sounding data in earth models with tilted principal axes of the electrical resistivity tensor // *J. Inverse Ill-Posed Probl.*, 2021, v. 29 (2), p. 295—304, doi: 10.1515/jiip-2020-0120.

Pardo D., Torres-Verdín C. Sensitivity analysis for the appraisal of hydrofractures in horizontal wells with borehole resistivity measurements // *Geophysics*, 2013, v. 78 (4), p. D209—D222, doi: 10.1190/geo2013-0014.1.

Ren Z., Kalscheuer T., Greenhalgh S., Maurer H. A finite-element-based domain-decomposition approach for plane wave 3D electromagnetic modeling // *Geophysics*, 2014, v. 79 (6), p. E255—E268, doi: 10.1190/geo2013-0376.1.

Shurina E.P., Epov M.I., Shtabel N.V., Mikhaylova E.I. The calculation of the effective tensor coefficient of the medium for the objects with microinclusions // *Engineering*, 2014, v. 6 (3), p. 101—112, doi: 10.4236/eng.2014.63014.

Shurina E.P., Itkina N.B., Shtabel N.V., Shtanko E.I., Kutishcheva A.Yu., Markov S.I., Dobrolubova D.V. Determination of thermal, stiffness and electrical effective tensors in composite media // *J. Comput. Appl. Math.*, 2022, v. 409, 114009, doi: 10.1016/j.cam.2021.114009.

Sun X., Nie Z.P. Vector finite element analysis of multicomponent induction response in anisotropic formations // *Progr. Electromagn. Res.*, 2008, v. 81, p. 21—39, doi: 10.2528/PIER07121502.

Wang H., Barber T., Chen K., Davydycheva S., Frey M., Homan D., Minerbo G., Morriss C., Rosenthal R., Smits J., Tumbiolo G. Triaxial induction logging: Theory, modeling, inversion, and interpretation // *SPE Int. Oil Gas Conf. Exhibition in China*, 2006, p. SPE-103897, doi: 10.2118/103897-MS.

Webb J.P. Hierarchical vector basis functions of arbitrary order for triangular and tetrahedral finite elements // *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1999, v. 47 (8), p. 1244—1253, doi: 10.1109/8.791939.

Weiss C.J., Newman G.A. Electromagnetic induction in a generalized 3D anisotropic earth, Part 2: The LIN preconditioner // *Geophysics*, 2003, v. 68 (3), p. 922—930, doi: 10.1190/1.1581044.